

## **DESAIN DAN STUDI AWAL DRAINASE BAWAH PERMUKAAN DI KOMPLEK HAMBALANG BOGOR**

### ***DESIGN AND PRELIMINARY STUDY OF SUBSURFACE DRAINAGE IN HAMBALANG COMPLEX BOGOR***

**Rokhmat Hidayat<sup>1)</sup>, Samuel Jonson Sutanto<sup>2)</sup>, Santosa Sandy Putra<sup>3)</sup>**

<sup>1,2,3)</sup> Balai Sabo, Puslitbang Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jl. Sopalan Maguwoharjo, Depok Sleman, Phone: +62-274-886350, Fax: +62-274-885431, Yogyakarta 55282, Indonesia.  
E-mail: rokmathidayat33@yahoo.com

Diterima: 17 Januari 2016; Direvisi: Januari 2016; Disetujui: 2 Juni 2016

#### **ABSTRAK**

*Pembangunan Pusat Pendidikan Pelatihan dan Sekolah Olah Raga Nasional (P3SON) sudah dilaksanakan di Hambalang, Sentul, Bogor, Jawa Barat dengan luas wilayah proyek tersebut mencapai 32 hektar. Lokasi pembangunan P3SON terletak di sebuah gunung kecil yaitu Gunung Hambalang yang mempunyai lereng yang terjal dan terdapat lapisan lempung yang tebal sehingga rawan terjadi longsor. Secara umum morfologi Hambalang mempunyai kemiringan berkisar antara 10–45°, dan pada beberapa tempat terutama pada lereng bangunan gedung, kemiringan lereng lebih dari 45°. Berdasarkan hasil pengeboran, profil batuan adalah lanau (silt) kedalaman 0-6 m, dan 6 m kebawah adalah lempung keras. Lapisan lempung bila terkena air akan bersifat kedap air dan mengembang. Jika ditambah faktor curah hujan yang tinggi, maka kemungkinan terjadinya longsor akan semakin besar. Untuk meningkatkan stabilitas lereng maka perlu dilakukan pembuatan drainase di luar kawasan sebelah Timur maupun drainase horizontal di dalam kawasan. Drainase pada sisi Timur lokasi studi dibuat dengan dua buah pipa besi yang memiliki diameter berkisar 20-35 cm dan diletakkan pada kedalaman 5 m. Secara teknis terdapat lima belas lokasi yang perlu dilakukan pembuatan drainase horizontal. Desain drainase horisontal adalah pipa dengan diameter 10 cm, spasi antar pipa drainase adalah 8 m, panjang pipa drainase 15-20 m, kemiringan pipa drainase 10°, dan karena kedalaman lapisan lanau adalah 0-6 m, maka posisi pipa drainase berkisar 3-5 m dari permukaan tanah. Konfigurasi sistem drainasi ini diharapkan dapat mengurangi resiko longsor di area Hambalang.*

**Katakunci:** Longsoran, curah hujan, peresapan, drainase bawah permukaan

#### **ABSTRACT**

*The “Pusat Pendidikan Pelatihan dan Sekolah Olah Raga Nasional (P3SON)” construction project was conducted at Hambalang, Sentul, Bogor, West Java. The project area covers 32 hectares. The P3SON project is located at a small mountain, called Gunung Hambalang, which has steep slope and thick clay layer. Generally, Hambalang morphology has a slope of about 10–45°, and at some places the buildings are built on steep slopes with the degree of steepness more than 45°. Based on to the bore log, the rock profile is silt rock with the deepness of 0-6 m, and under 6 m, there is a hard clay layer. Clay layer if it is in contact with water will become impermeable and thus swell. During the high intensity rainfall event, the landslide risk is high. In order to strengthen the slope stability, an outer subsurface drainage at the East side and also horizontal subsurface drainage system in the area itself are proposed. The twin iron pipes are designed for the East side drainage system with the diameter of 20-35 cm and laid 5 m under the surface elevation. Technically, there are fifteen locations that need horizontal drainage installation. Horizontal drainage pipes are designed with 10 cm diameter and 8 m interval between pipes. The length of the horizontal drainage pipes is 15-20 m with slope of 10°. Due to the fact that the silt layer depth is 0-6 m, then the horizontal drainage pipes will be located in 3-5 m depth from the surface. Optimistically, this system will reduce the landslide risk in Hambalang area.*

**Keywords:** Landslide, precipitation, infiltration, subsurface drainage

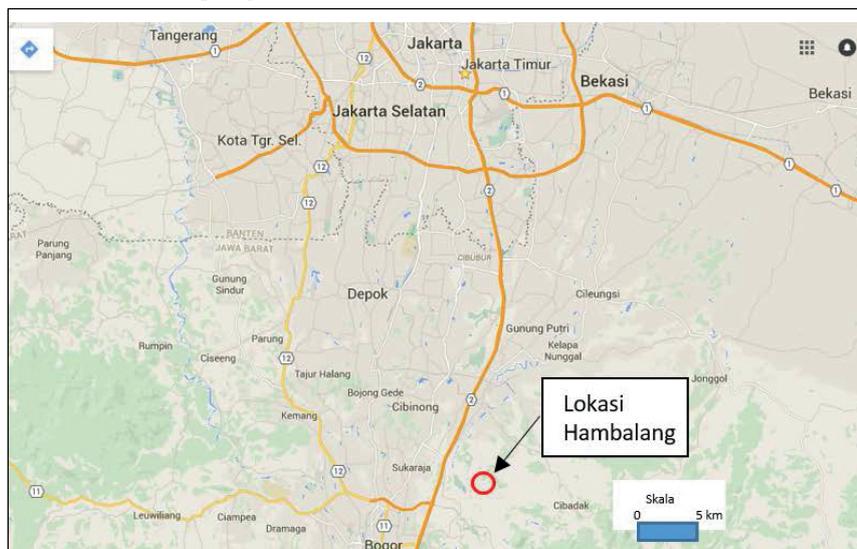
**PENDAHULUAN**

Pembangunan Pusat Pendidikan Pelatihan dan Sekolah Olah raga Nasional (P3SON) telah dilaksanakan sejak tahun 2003 di Hambalang, Sentul, Bogor, Jawa Barat dengan luas wilayah proyek mencapai 32 hektar. Kejadian longsoran pertama kali terjadi mulai bulan Desember 2011 pada beberapa lokasi di proyek Hambalang (BAKN DPR RI, 2012). Di antara lokasi yang mengalami longsor adalah lapangan bulu tangkis dan gardu listrik. Lokasi tersebut terletak di punggung bukit yang punya derajat kemiringan cukup tinggi. Sejak saat itu, maka proyek pembangunan P3SON dihentikan sejak 4 tahun lalu. Namun dengan adanya kunjungan Presiden Joko Widodo pada tanggal 18 Maret 2016 (Broto, 2016), maka ada kemungkinan proyek Hambalang yang sempat terhenti akan dilanjutkan jika memungkinkan demi menyelamatkan aset negara yang telah menghabiskan anggaran trilyunan rupiah. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) melalui Badan Litbang PUPR ditunjuk untuk melakukan kajian apakah proyek Hambalang dapat dilanjutkan kembali atau tidak.

Salah satu rekomendasi dari beberapa kajian yang pernah dilakukan di daerah Hambalang baik oleh pihak Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) maupun Kementerian Pekerjaan Umum pada tahun 2012 adalah diperlukannya pembuatan drainase bawah permukaan (*sub-surface drainage*) untuk mengalirkan air sehingga kestabilan lereng akan semakin meningkat. Hal ini telah dilakukan di beberapa negara dengan pembuatan drainase horisontal untuk menstabilkan lereng (Locat J, dkk., 2008; Hardiyatmo, 2012; Greg, dkk., 2013; Rahardjo, dkk., 2003). Lin dkk., 2016 meneliti pengaruh drainase

horisontal terhadap stabilitas lereng di Li San, Taiwan. Keberadaan drainase horisontal dapat menurunkan muka air tanah sedalam 40 m dibanding tanpa perlakuan dan nilai stabilitas lereng (FS) naik dari 1,096 menjadi 1,228. Untuk merencanakan drainase horisontal harus dihitung volume air hujan yang meresap dan juga perlu diketahui distribusi hujannya (Soewarno, 2015). Selain untuk kestabilan lereng, drainase horisontal juga dapat digunakan untuk bidang pertanian (Kalsim, 2012). Drainase horisontal yang dipasang di sepanjang kaki lereng memberikan stabilitas lebih tinggi yang daripada dipasang pada lereng yang lebih tinggi. Stabilitas lereng juga meningkat dengan meningkatnya panjang saluran air dan kerapatan saluran (Pathmanathan 2013). Salah satu pilihan yang paling efektif untuk menstabilkan tanah longsor adalah mengurangi kandungan jumlah air dengan drainase horisontal. Sebuah metode baru drainase horisontal menggunakan bahan geosynthetic (Santi 2001, Cook 2001).

Untuk daerah Hambalang, drainase bawah permukaan diprioritaskan dipasang pada tebing-tebing yang rawan terjadi longsor, dan pada lapangan atletik seperti lapangan bola. Selain menggunakan drainase horisontal pada bagian dalam kawasan Hambalang, penataan sistem drainase bawah permukaan juga perlu memperhatikan sistem drainase pada sisi sebelah Timur untuk mencegah adanya air tanah dangkal (*soil water*) masuk ke dalam kawasan. Oleh karena itu, Sasaran dari kegiatan ini adalah tersusunnya rekomendasi teknis terkait pembuatan disain drainase bawah permukaan kawasan untuk mengeluarkan air dari dalam tanah sehingga stabilitas lereng meningkat. Lokasi penelitian berada pada kompleks pembangunan P3SON di Desa Hambalang, Bogor, Jawa Barat (Gambar 1).



**Gambar 1** Lokasi kegiatan di Hambalang Bogor (Sumber: Google.map).

## METODOLOGI

Secara umum metode penelitian yang digunakan untuk kajian desain dan studi awal sistem drainase bawah permukaan dapat dijabarkan sebagai berikut:

- 1) Survei lapangan untuk melihat kondisi eksisting, daerah-daerah rawan longsor, dan penentuan lokasi drainase bawah permukaan.
- 2) Analisis kondisi geologi dan lapisan tanah.
- 3) Analisis data hujan yang melingkupi distribusi hujan dan perhitungan hujan wilayah.
- 4) Analisis hujan yang meresap ke dalam tanah (*recharge*).
- 5) Perhitungan debit air tanah yang masuk ke kawasan Hambalang.
- 6) Desain kapasitas dan lokasi-lokasi penempatan drainase bawah permukaan.
- 7) Rekomendasi-rekomendasi teknis terkait drainase bawah permukaan.

Dengan adanya penanganan drainase bawah permukaan maka kandungan air pada tanah atau batuan akan berkurang sehingga stabilitas lereng menjadi naik.

### Analisis distribusi hujan

Analisis distribusi hujan dibuat untuk dapat menentukan disain pola distribusi hujan yang terjadi di daerah Hambalang. Analisis tersebut dilakukan untuk menentukan pola hujan yang digunakan dalam analisis lebih lanjut seperti: analisis hidrograf banjir, analisis resapan air ke dalam tanah, dan analisis aliran permukaan. Data hujan jam-jaman dikumpulkan dari pos hujan terdekat yang kemudian dikelompokkan menurut lama terjadinya hujan. Data yang diambil adalah data hujan yang berurutan kejadiannya dan mempunyai besar hujan lebih besar dari 30 mm. Dari hasil pengelompokan tersebut dapat diketahui durasi hujan yang sering terjadi. Presentase hujan yg terjadi setiap jamnya dihitung dengan memodifikasi nilai persentase rata-rata hujan mengikuti pola distribusi menyerupai bentuk bel.

### Analisis resapan hujan (*recharge*)

Analisis resapan hujan ke dalam tanah digunakan untuk mendisain drainase bawah permukaan. Ada banyak metode yang dapat digunakan untuk menghitung besarnya aliran yang meresap ke dalam tanah. Dalam kajian ini digunakan metode yang dikembangkan oleh departemen pertanian dan konservasi tanah di Amerika yang dinamakan metode SCS (*Soil Conservation Service; USDA-SCS, 1972*). Metode SCS ini menggunakan asumsi bahwa besarnya air hujan yang menjadi aliran permukaan tergantung dari

penutup lahan, jenis tanah, dan kejenuhan tanah. Metode ini sangat sederhana karena hanya menggunakan satu parameter, yaitu parameter *Curve Number (CN)*. Pada metode SCS ini, aliran yang meresap ke tanah dihitung dengan rumus:

$$F_a = \frac{S'(P-I_a)}{P-I_a+S'} \quad (1)$$

dengan:

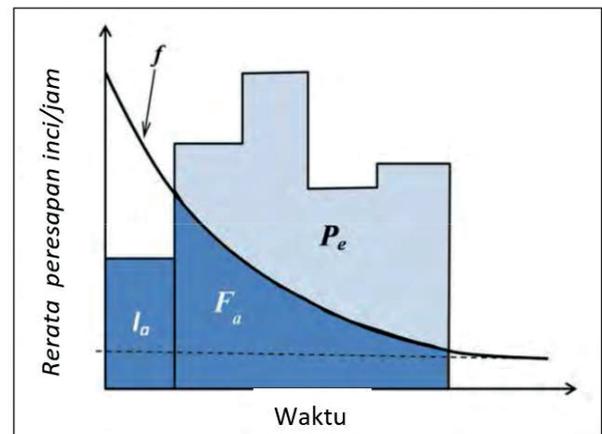
$$S' = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2)$$

$$I_a = 0.2S' \quad (3)$$

Dimana  $P$  adalah hujan,  $S'$  adalah kapasitas simpanan air tanah yang diasumsikan sebagai fungsi dari CN tanah,  $I_a$  adalah kehilangan awal dimana kehilangan tersebut adalah 20% dari potensi kapasitas simpanan air tanah. Besarnya air hujan yang menjadi aliran permukaan ( $P_e$ ) dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_e = P - I_a - F_a \quad (4)$$

Jika nilai CN dan besaran hujan diketahui, maka besarnya air yang meresap ke dalam tanah dapat diketahui. Konsep dari metode SCS ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Konsep metode SCS (sumber: Pohll, dkk., 2013)

### Analisis aliran air tanah

Metode yang digunakan untuk menghitung besarnya debit aliran air tanah adalah dengan menggunakan hukum Darcy (Darcy, 1856). Untuk menghitung debit aliran air tanah dangkal yang masuk ke dalam area Hambalang, maka diperlukan data koefisien hidraulik konduktifiti ( $K$ ), jarak antara lokasi tinggi muka air di hulu dan hilir ( $X$ ), dan data tinggi muka air tanah pada bagian hulu ( $h_1$ ) dan hilir ( $h_2$ ). Daerah Hambalang merupakan daerah yang hanya mempunyai aliran air tanah

bebas dan dangkal (*unconfined aquifer*). Dengan memperhatikan hal tersebut dan dengan menggunakan asumsi aliran langgeng (*steady state*), maka debit air tanah persatuan lebar ( $Q'$ ) dapat dihitung dengan formula sebagai berikut:

$$Q' = -Kh \frac{dh}{dx} \tag{5}$$

$$Q' = -\frac{K}{2X}(h_2^2 - h_1^2) \tag{6}$$

**Analisis kapasitas pipa drainase**

Dimensi pipa yang diperlukan untuk mengalirkan air bawah permukaan dapat dihitung dengan menggunakan formula Manning, dengan asumsi bahwa aliran dalam pipa terisi setengah. Formula ini juga dapat digunakan untuk menghitung aliran air pada saluran maupun sungai. Perhitungan debit pada pipa atau saluran dengan menggunakan persamaan Manning (Chow et.al 1988) adalah sebagai berikut:

$$Q = V \cdot A \tag{7}$$

$$V = \frac{1}{n} R^{0.67} S^{0.5} \tag{8}$$

$$R = \frac{A}{P} \tag{9}$$

dengan  $Q$  adalah debit aliran,  $n$  koefisien kekasaran Manning,  $R$  jari-jari hidraulik,  $S$  kemiringan dasar pipa atau saluran,  $A$  luas penampang basah, dan  $P$  keliling penampang basah. Kekasaran Manning dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut.

**Tabel 1** Koefisien kekasaran Manning (Forrester, 2001).

Pipe material	Manning roughness coefficient		
	Maximum	Average	Minimum
Galvanized steel	0.017	0.016	0.012
Precast concrete	0.013	0.012	0.011
Polyvinyl chloride (PVC)		0.009	
Clay tile	0.017	0.014	0.011
Clay spigot/socket	0.017	0.014	0.010

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Kondisi geologi daerah studi**

Secara umum morfologi daerah Hambalang merupakan perbukitan bergelombang rendah dengan relief sedang. Pada lereng bagian atas mempunyai kemiringan berkisar antara 10-20°, pada lereng bagian tengah mempunyai kemiringan lereng antara 5-15°, sedangkan pada lereng bagian bawah berkemiringan antara 20-30° dan setempat-

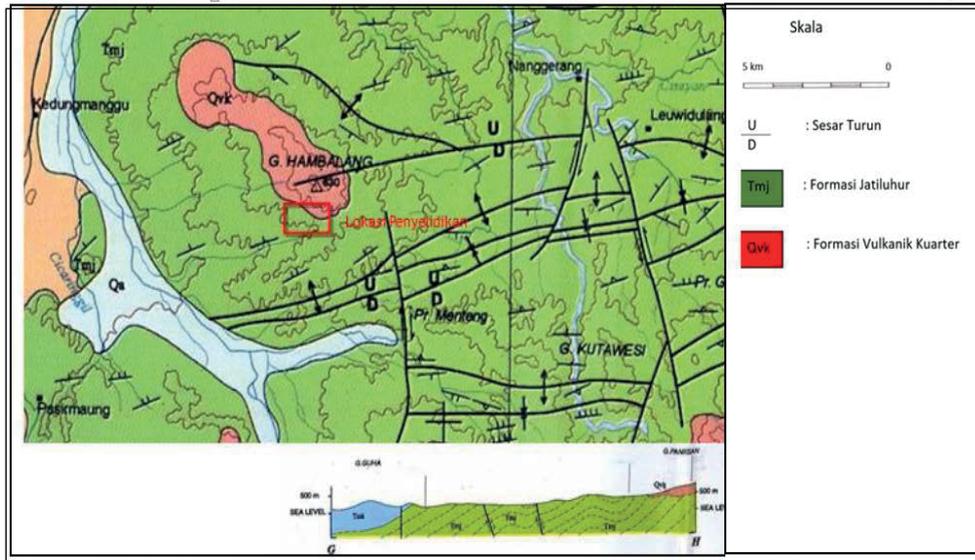
setempat. Pada gawir tekuk lereng di bawah bangunan gedung dan tebing sungai mempunyai kemiringan lereng lebih dari 45°. Pada bagian lembah mengalir anak sungai Citeureup yang merupakan sungai temporer artinya sungai yang mempunyai debit air cukup besar pada musim hujan dan berdebit kecil atau kering pada musim kemarau.

Berdasarkan peta Geologi lembar Bogor (Luthfi dkk, 1995), lokasi proyek berada pada formasi Jatiluhur (*Tmj*) dengan umur geologi dari zaman Miosen Awal. Formasi Jatiluhur (*Tmj*) terdiri dari Napal (*marl*), serpih lempungan (*clayshale*) dan sisipan batupasir kuarsa (Gambar 3). Batuan penyusun daerah tersebut di bagian atas berupa breksi vulkanik berumur Kuarter, kurang kompak yang bagian permukaan lapuk sempurna menjadi lempung pasiran, berwarna coklat keabuan, lunak, tebal 0,30-1,50 m. Pada batuan breksi tersebut di beberapa tempat terdapat lensa-lensa atau sisipan batu lempung menyerpih, bersifat mengembang (*swelling clay*), berwarna abu-abu sampai abu-abu kecoklatan, kaku, sebagian terkersikkan, dan lunak bila tersingkap di permukaan. Lensa atau sisipan batu lempung ini dijumpai pada lereng bagian atas pada tebing jalan di bawah masjid dan pada lereng bagian tengah pada tebing (tekuk lereng) di bawah bangunan asrama atlet putra (Gambar 4).

Berdasarkan peta geologi, secara regional daerah pemeriksaan merupakan sayap utara dari antiklin yang berarah relatif ke barat-timur, yang berada di sebelah selatan daerah pemeriksaan. Di sebelah utara daerah pemeriksaan terdapat patahan (sesar) normal atau sesar turun yang berarah relatif ke barat - timur, dimana bagian selatan relatif turun terhadap blok di bagian utaranya.

**Kondisi keairan**

Kondisi keairan pada lereng bagian atas dan tengah berupa air permukaan yang mengalir bebas ke arah lereng bagian bawah, sedangkan pada lembah-lembah terdapat alur-alur sungai yang berair pada waktu hujan, sedangkan pada musim kemarau kering. Selain itu juga terdapat beberapa titik mata air yang mempunyai debit air kecil yang kering pada musim kemarau dan mengalir bebas di permukaan. Pada saat musim hujan banyak terjadi genangan seperti yang terlihat pada lapangan bola (Gambar 5).



**Gambar 3** Peta geologi daerah Hambalang (Luthfi, dkk., 1995).



**Gambar 4** Kondisi lempung, di lokasi sebelah selatan asrama putri Hambalang.

### Masalah gerakan tanah

Berdasarkan Peta Zona Kerentanan Gerakan Tanah Kabupaten Bogor (Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1991), daerah tersebut terletak pada Zona Kerentanan Gerakan tanah Menengah, artinya daerah yang mempunyai tingkat kerentanan menengah untuk terkena gerakan tanah, pada zona ini dapat terjadi gerakan tanah terutama pada daerah yang berbatasan dengan lembah sungai, gawir, tebing jalan, atau jika lereng mengalami gangguan.

Gerakan tanah lama dapat aktif kembali akibat curah hujan tinggi dan resapan air. Gerakan tanah yang dijumpai berupa nendatan yang terjadi di lereng bagian tengah sebagai akibat penggalian atau pemotongan lereng, yang di ikuti oleh lapisan batuan di atasnya. Bangunan yang rusak berdiri di atas material longsor, sehingga bangunan ini hancur pada waktu terjadi longsor. Longsor ini dipicu akibat penggalian lereng hingga memotong lapisan batu lempung mengembang, yang memicu terjadinya longsor pada lokasi ini.



**Gambar 5** Kondisi genangan air pada lapangan bola setelah hujan (sumber: KSO Adhi-Wika 2012).

Longsor terjadi pada saat dilakukan penggalian lereng untuk rencana perluasan bangunan sarana olah raga. Dari hasil pengamatan lapangan dan data sekunder, maka dapat di formulasikan beberapa faktor penyebab terjadinya bencana gerakan tanah di kompleks Hambalang sebagai berikut:

- 1) Sifat fisik batu lempung yang mudah mengembang dan membubur bila jenuh air. Terlebih lagi sifat fisik tanah timbunan yang lepas, kurang padat dan sarang (mudah menyerap air).
- 2) Adanya air permukaan yang mengalir bebas di permukaan yang meresap ke dalam tanah sehingga menjenuhkan lapisan batu lempung. Batu lempung yang jenuh air tersebut akan mengembang dan menjadi bubur sehingga mudah terjadi longsor.
- 3) Adanya penggalian pada lereng bagian bawah yang terjal ( $>60^\circ$ ) dan memotong lapisan lempung mengembang, sehingga lapisan batuan penutup diatas batu lempung bergerak ke bawah.

Kondisi batulempung di lokasi proyek Hambalang bersifat tetap atau tidak bisa diubah sifatnya. Rekayasa bisa dilakukan pada poin dua dan tiga dengan drainase bawah permukaan dan sistem pemotongan lereng untuk meningkatkan stabilitas lereng.

#### **Analisis peresapan air kawasan Hambalang**

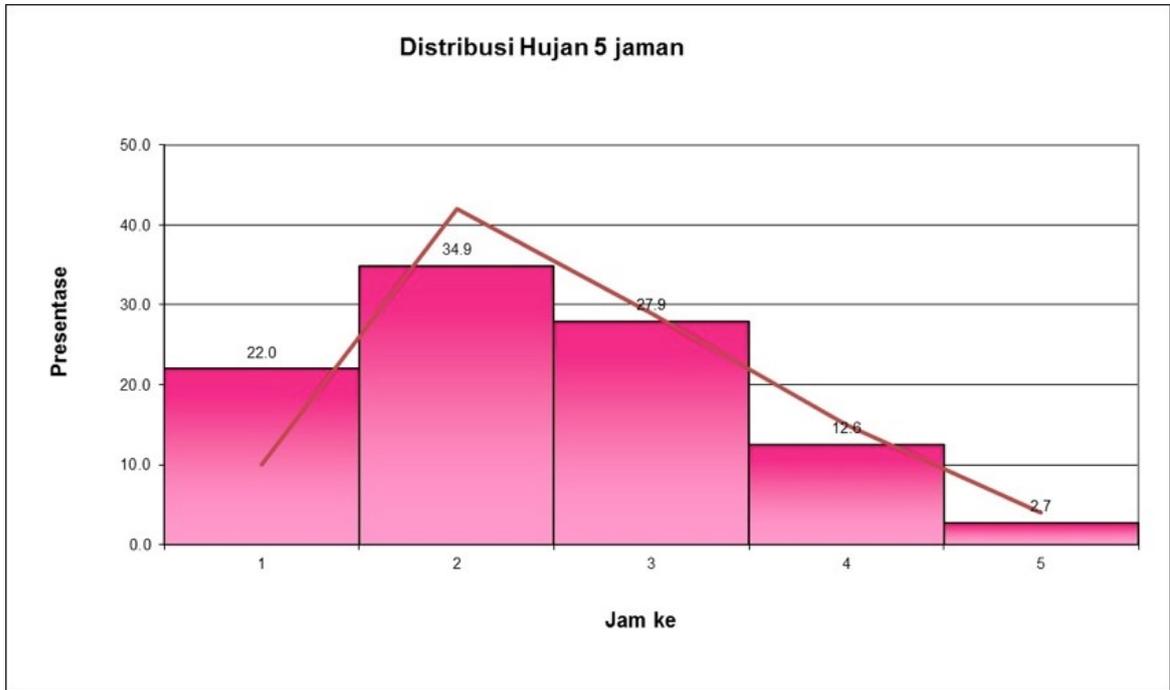
Analisis hujan yang meresap ke dalam tanah (*recharge*)

Untuk analisis hujan yang meresap ke dalam tanah diperlukan adanya data hujan durasi pendek (jam-jaman). Data hujan durasi pendek pada pos terdekat dengan Hambalang tidak tersedia sehingga data yang digunakan yaitu pos Citeko ( $6^\circ41'52,1''$  LS dan  $106^\circ56'06,1''$  BT) milik Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) yang berada di kawasan Puncak, Bogor. Analisis distribusi hujan dilakukan dengan menggunakan data hujan dari pos tersebut dengan panjang data pengamatan dari tahun 2006 hingga 2016. Analisis dilakukan untuk menentukan pola distribusi hujan yang sering terjadi di daerah Bogor dan akan digunakan dalam analisis hujan yang meresap ke dalam tanah. Data hujan jam-jaman kemudian dikelompokkan menurut lamanya terjadinya hujan dengan catatan bahwa data yang diambil adalah data hujan yang berurutan kejadiannya dan mempunyai besar hujan lebih besar dari 30 mm. Dari hasil pengelompokan tersebut dapat diketahui kemungkinan hujan yang terjadi. Dari hasil analisis diperoleh bahwa hujan yang sering terjadi mempunyai durasi selama 5 jam dengan pola distribusi seperti yang terlihat pada Gambar 6.

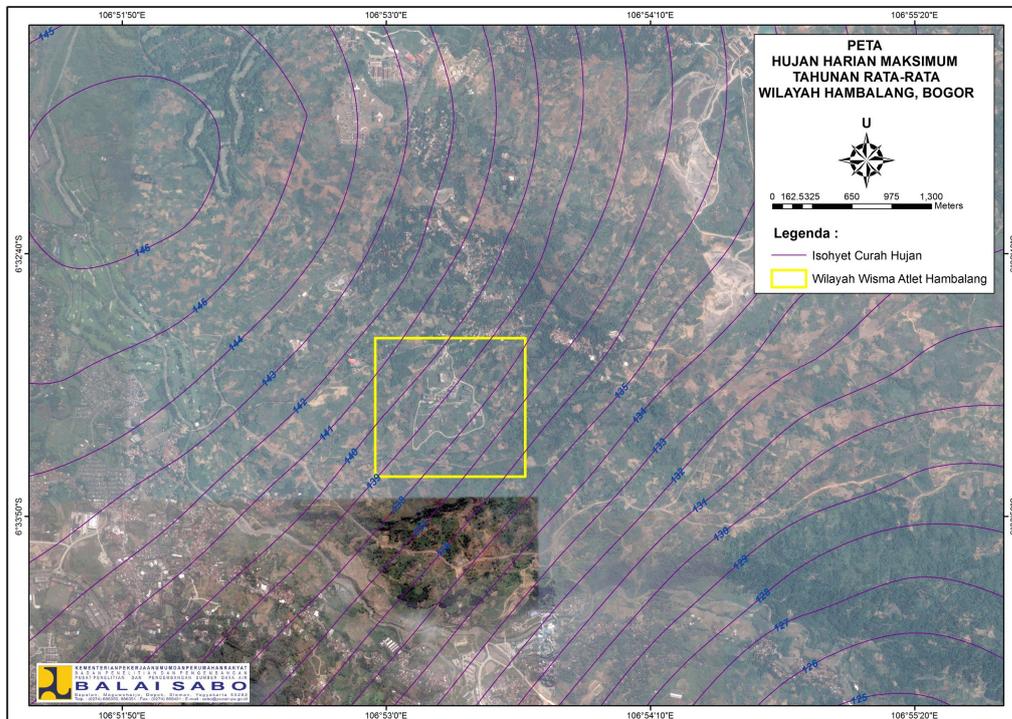
Analisis hujan wilayah dilakukan untuk mengetahui besarnya hujan maksimum dalam sehari yang jatuh di wilayah Hambalang (Gambar 7). Data untuk analisis ini diperoleh dari hasil

penelitian Puslitbang Air pada tahun 2008 dan di tumpang susunkan pada lokasi Hambalang. Dari hasil analisis diperoleh besarnya hujan harian

maksimum tahunan rata-rata wilayah Hambalang adalah sebesar 138,5 mm.



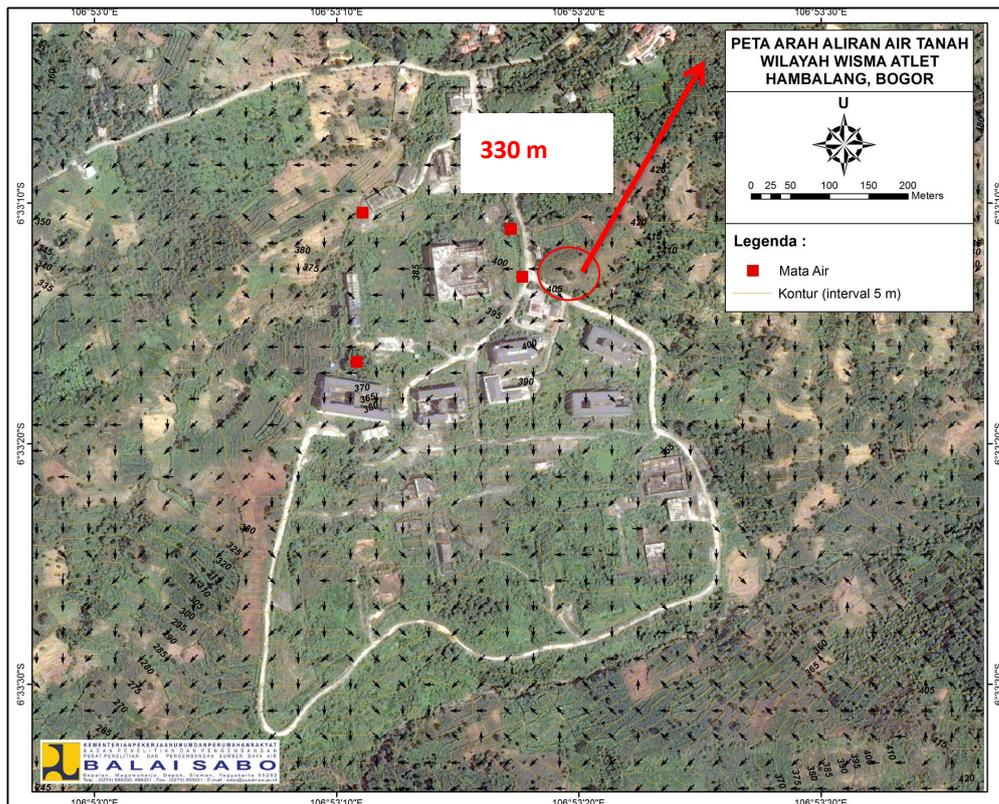
Gambar 6 Distribusi hujan 5 jaman pos Citeko.



Gambar 7 Isohiet hujan harian maksimum tahunan rata-rata wilayah Bogor (Puslitbang Air, 2008).

**Tabel 2** Perhitungan aliran limpasan dan yang meresap ke dalam tanah.

Waktu	Dist P	P <sub>inc</sub>	P	I <sub>a</sub>	F <sub>a</sub>	F <sub>a,inc</sub>	P <sub>e</sub>
Jam	%	Inci	Inci	Inci	Inci	Inci	Inci
1	10	5,4528	5,4528	2	2,57	2,57	0,89
2	42	22,902	28,354	2	7,25	4,68	19,11
3	29	15,813	44,167	2	8,08	0,83	34,08
4	15	8,1791	52,346	2	8,34	0,26	42,00
5	4	2,1811	54,528	2	8,40	0,06	44,13



**Gambar 8** Pola perkiraan aliran air tanah dangkal

Besarnya aliran yang meresap ke dalam tanah diperlukan dalam mendisain drainase bawah permukaan. Hasil perhitungan aliran yang meresap ke dalam tanah, dan yang menjadi aliran permukaan dapat dilihat pada Tabel 2. Dari hasil analisis diperoleh hujan yang meresap ke dalam tanah adalah sebesar 8,4 inci atau sebesar 21,3 mm. Jadi besarnya nilai air yang meresap ke dalam tanah adalah sebesar 1,18 l/s. Nilai Curve Number (CN) yang digunakan dalam perhitungan adalah sebesar 50. Nilai ini merupakan nilai CN untuk grup hidrologi tanah tipe B, penutup lahan kombinasi semak-semak dan rumput, dan kondisi hidrologi penutup lahan antara sedang dan baik (Pohll, dkk., 2013).

**Analisis debit air tanah yang masuk ke kawasan Hambalang**

Analisis debit air tanah yang masuk ke dalam area Hambalang dilakukan dengan metode Darcy. Pola aliran air tanah dangkal pada area Hambalang diasumsikan mengikuti pola aliran air permukaan dikarenakan tidak tersedianya data hidrogeologi, serta data air tanah dangkal dari inclinometer menunjukkan tinggi air tanah yang mengikuti kontur setempat. Hasil dari analisis pola air tanah menunjukkan bahwa aliran air bawah permukaan yang masuk ke dalam area Hambalang berasal dari arah Timur Laut atau gunung Hambalang (Gambar 8).

Untuk Hambalang, pengamatan tinggi muka air dilakukan di sumur penduduk dilakukan sejauh kurang lebih 333 m kearah Timur Laut dari mata air di bagian Utara Timur (lingkaran pada Gambar 8). Menurut informasi dari

penduduk, pada saat musim kemarau, sumur tersebut kering sedangkan pada saat musim hujan air dari dalam sumur dapat meluap hingga ke permukaan. Oleh karena itu perhitungan debit yang masuk ke dalam area Hambalang dilakukan dengan dua asumsi. Asumsi pertama adalah perhitungan dengan tinggi muka air pada sumur penduduk sedalam 5 m, dan yang kedua jika sumur penduduk penuh terisi air pada saat musim hujan. Kedalaman sumur penduduk akan ditahan sedalam 5 m pada musim kemarau karena air dari sumur tersebut merupakan sumber air bagi penduduk untuk kebutuhan sehari-hari. Dengan menggunakan persamaan Darcy dan data yang diperoleh, maka debit air tanah dangkal yang masuk ke dalam kawasan Hambalang pada saat musim kemarau (kedalaman sumur penduduk 5 m) adalah sebesar 0,44 l/s per satuan lebar (dengan nilai tetapan  $K = 10^{-5}$  untuk tanah lanau) dan pada saat musim hujan sebesar 0,51 l/s per satuan lebar.

#### Analisis drainase bawah permukaan

Analisis sistem drainase bawah permukaan untuk kompleks P3SON Hambalang dapat dibagi menjadi dua sistem. Sistem yang pertama adalah sistem drainase bawah permukaan untuk mencegah debit yang berasal dari luar wilayah (sisi Timur) masuk ke dalam area kompleks P3SON. Dari hasil pengamatan lapangan terlihat bahwa debit bawah permukaan yang berasal dari luar kawasan sangat besar pada musim hujan sehingga dapat mengganggu kestabilan tanah di dalam kawasan. Sistem yang kedua adalah sistem drainase di dalam kawasan itu sendiri dimana hujan yang jatuh di dalam kawasan dapat meresap ke dalam tanah dan menimbulkan aliran bawah permukaan. Untuk itu digunakan sistem drainase horizontal untuk mengalirkan aliran bawah permukaan tersebut.

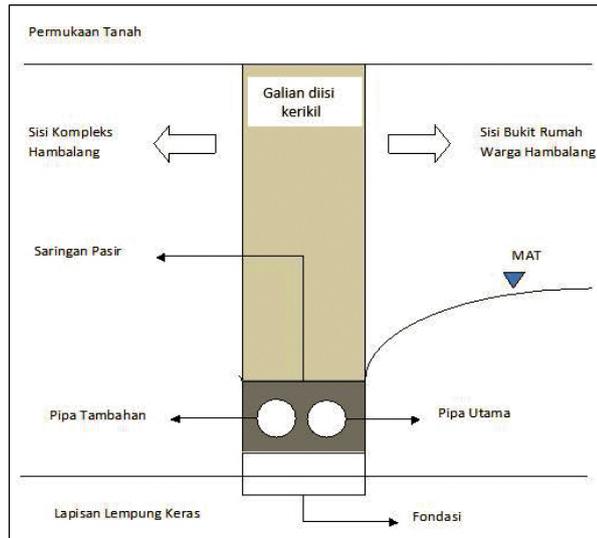
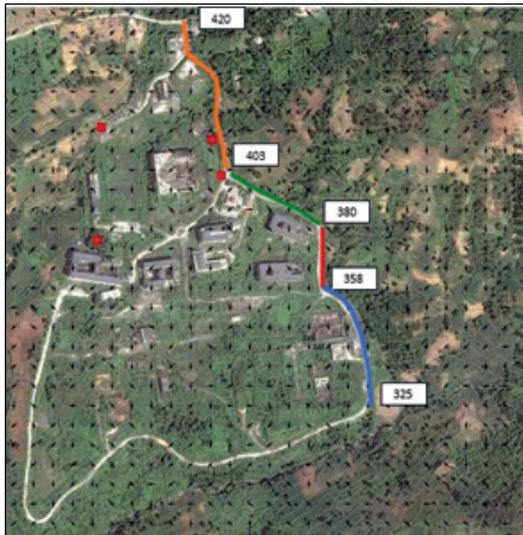
#### Analisis sistem drainase bawah permukaan sisi Timur

Drainase bawah permukaan pada sebelah Timur kawasan dibuat untuk mengalirkan air tanah dangkal yang mengalir dari luar kawasan masuk ke dalam kawasan Hambalang. Tujuan dibuat saluran drainase bawah permukaan ini adalah untuk mencegah adanya aliran air tanah dari luar kawasan (dari arah Timur Laut) yang dapat mengakibatkan ketidakstabilan lereng-lereng yang berada di dalam kawasan. Debit yang digunakan untuk disain adalah sebesar 0,44 l/s untuk musim kemarau dan 0,51 l/s untuk musim penghujan. Saluran bawah permukaan direncanakan menggunakan pipa dari besi dengan koefisien kekasaran Manning ( $n$ ) sebesar 0,017 (pipa besi; Forrester, 2001). Hasil perhitungan dimensi pipa dapat dilihat pada Tabel 3.  $Q_D$  adalah debit yang mengalir di dalam pipa jika terisi setengah dikarenakan di bagian atas pipa harus dibuat berlubang untuk masuknya air ke dalam pipa dan di lapis dengan geotekstil, dan  $Q_{AT}$  adalah debit air tanah dangkal. Dari hasil perhitungan terlihat bahwa pipa yang dibutuhkan untuk mengalirkan air bawah permukaan yang akan masuk ke dalam kawasan adalah pipa dengan diameter antara 0,20-0,35 m untuk musim kemarau dan 0,25-0,40 m untuk musim penghujan. Lokasi pemasangan pipa seperti pada Gambar 9 kiri dibawah ini.

Untuk menjaga sumur penduduk tidak kering pada saat musim kemarau, maka saluran bawah permukaan dibuat dua buah dengan satu pipa di tutup pada saat musim kemarau dan dua pipa dibuka pada saat musim hujan. Untuk mempermudah pekerjaan dan mengantisipasi debit air tanah dangkal yang cukup besar pada saat terjadi hujan ekstrim, maka di usulkan untuk membuat dua buah pipa berukuran sama seperti pada saat musim kemarau. Tampilan penampang melintang disain drainase bawah permukaan dapat dilihat pada Gambar 9 kanan.

**Tabel 3** Perhitungan dimensi pipa yang diperlukan.

No	Warna	Jarak (m)	Beda tinggi (m)	S	Diamete (m)	A	P	R	$Q_D$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{AT}$ (m <sup>3</sup> /s)	Selisih
<b>Musim Kemarau</b>											
1	Oranye	277,76	17	0,061	0,3	0,048	0,5495	0,0875	0,1292	0,1222	-0,0070
2	Hijau	162,2	23	0,142	0,2	0,025	0,3925	0,0625	0,0801	0,0714	-0,0087
3	Merah	113,16	22	0,194	0,2	0,016	0,314	0,05	0,0517	0,0498	-0,0019
4	Biru	188,01	33	0,176	0,2	0,025	0,3925	0,0625	0,0891	0,0827	-0,0064
<b>Musim Penghujan</b>											
1	Oranye	277,76	17	0,061	0,4	0,063	0,628	0,1	0,1845	0,1417	-0,0429
2	Hijau	162,2	23	0,142	0,3	0,035	0,471	0,075	0,1303	0,0827	-0,0476
3	Merah	113,16	22	0,194	0,2	0,025	0,3925	0,0625	0,0938	0,0577	-0,0361
4	Biru	188,01	33	0,176	0,3	0,035	0,471	0,075	0,1450	0,0959	-0,0491



(Sumber: Hasil analisis)

**Gambar 9** Lokasi pemasangan drainase bawah permukaan pada sisi Timur (kiri) dan disain pipa (kanan)

**Sistem drainase horisontal**

Air hujan yang jatuh di permukaan tanah sebagian akan mengalir di atas permukaan tanah dan sebagian akan masuk meresap ke dalam tanah. Air yang masuk ke dalam tanah menyebabkan tanah menjadi berat, dan nilai kohesi menjadi turun. Akibatnya stabilitas tanah menjadi turun.

Untuk mempercepat pengeringan air di atas permukaan tanah yang berada di dalam kawasan maka perlu dipasang drainase horisontal dengan yang di sebelah atasnya berlubang-lubang pada kedalaman tertentu. Dengan terjadinya proses pengeringan tanah maka tanah menjadi ringan dan nilai kohesi tanah meningkat, sehingga stabilitas lereng meningkat. Contoh drainase horisontal dapat dilihat pada gambar 10.

Menurut SNI 03-1962-1990 drainase horisontal merupakan satu cara untuk menangani longsor, dibuat untuk mengalirkan air atau menurunkan muka air tanah pada daerah longsor. Metode ini dapat digunakan pada longsor besar dengan bidang gelincir yang dalam dengan membuat lubang setengah mendatar hingga mencapai sumber airnya. Air dialirkan melalui pipa dengan diameter minimal 5 cm atau lebih yang berlubang pada dindingnya. Penempatan pipa-pipa penyalir tergantung dari jenis material yang akan diturunkan muka air tanahnya. Untuk material yang berbutir halus jarak masing-masing pipa antara 3-8 m, sedangkan untuk material berbutir kasar dengan jarak antara 8-15 m. Efektifitas cara ini tergantung dari permeabilitas tanah yang akan menentukan banyaknya air yang dapat dialirkan keluar.

Kondisi batuan kompleks hambalang adalah batuan berukuran butir lanau (*silt*) dan lanau, sehingga desain drainase horisontal direncanakan dengan diameter pipa 10 cm spasi antar pipa drainase 8 m, panjang pipa drainase 15-20 m (tergantung dari penutup lahan), serta kemiringan pipa drainase 7°. Karena kedalaman lapisan lanau adalah 0-6 m, sehingga posisi pipa drainase berkisar 4-5 m dari permukaan tanah.



**Gambar 10** Contoh Drainase Horisontal (Kopecky, dkk., 2013).

**Contoh rencana lokasi pemasangan pipa drainase**

**Lokasi pondasi tribun sepakbola bagian Barat Daya**

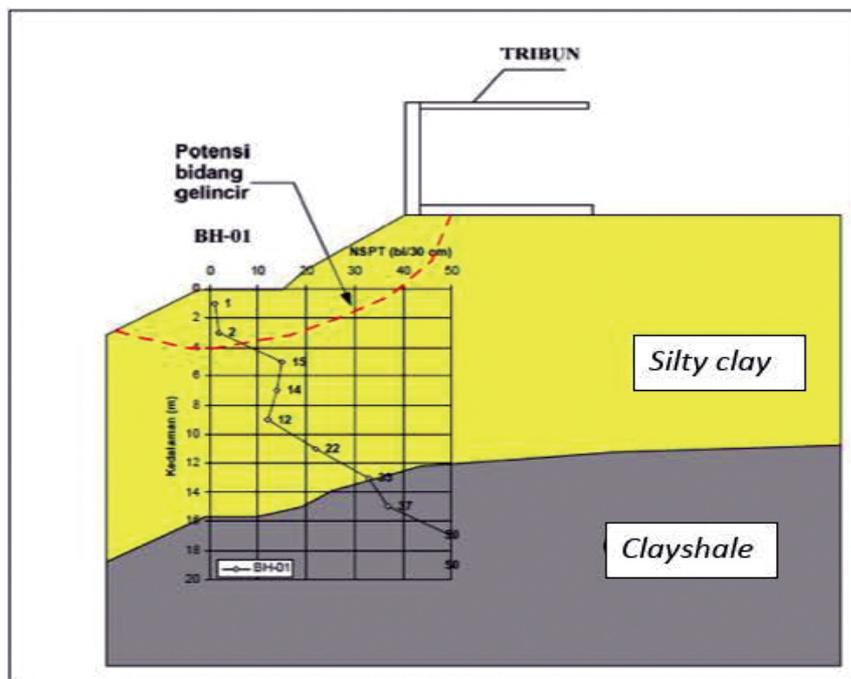
Pada bagian belakang bangunan Tribun lapangan sepak bola merupakan lereng timbunan dengan kondisi visual nampak lunak. Pada bagian kaki lereng terdapat saluran yang langsung berbatasan dengan pagar batas lahan.

Mempertimbangkan kondisi lereng tersebut maka dikhawatirkan adanya resiko pergerakan lereng yang dapat berpengaruh kepada Tribun (Gambar 11).

Pengeboran yang pertama dilakukan adalah di lokasi ini yang ditempatkan di bagian lereng, sekitar bagian tengah dari lereng. Hasil pemboran menunjukkan adanya tanah lepas dari permukaan lereng hingga kedalaman sekitar 4 m. Melihat kondisi tanah secara visual maka diduga tanah tersebut merupakan tanah buangan, atau tanah yang ditempatkan di bagian lereng tanpa adanya pemadatan yang memadai (Gambar 12).



Gambar 11 Longsor di pondasi tribun stadion bola.



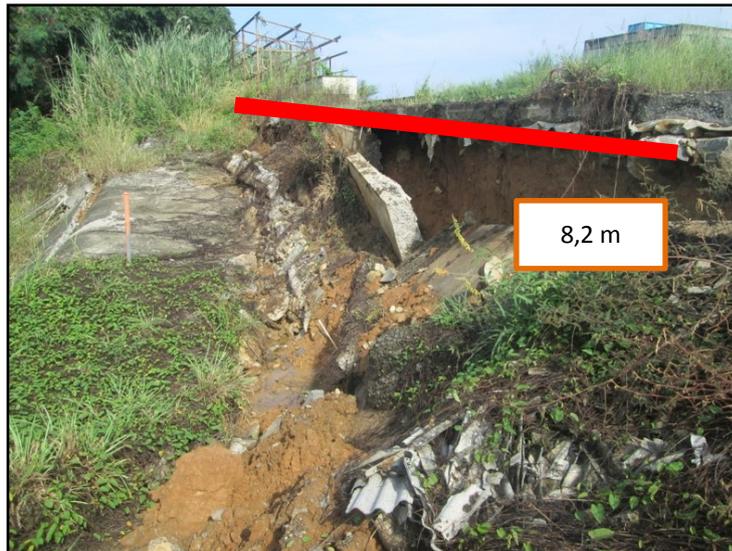
Gambar 12 Litologi pada lokasi longsor hasil pemboran (KSO Adhi-Wika, 2012).

### Lereng sebelah Utara dari asrama elit putra

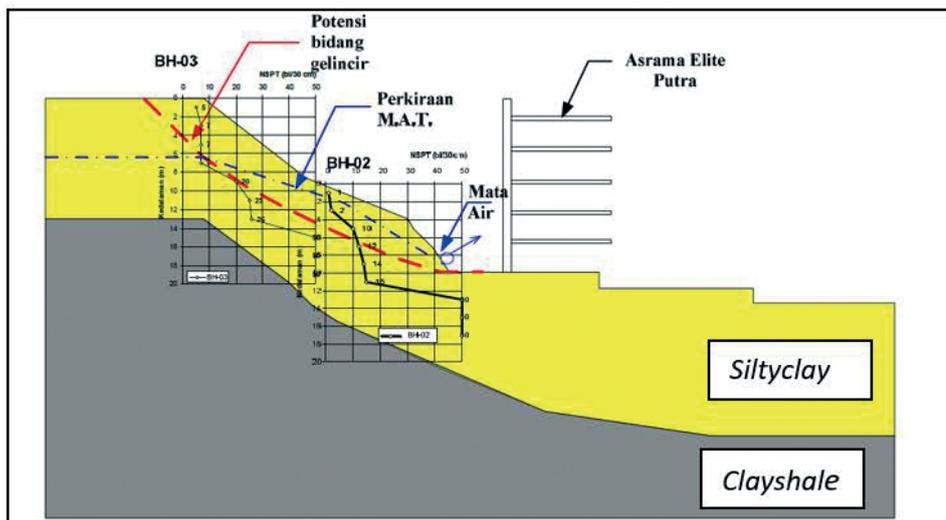
Longsoran terjadi merupakan timbunan yang telah diperkuat dengan menggunakan geogrid. Dan berdasarkan informasi yang diperoleh, perbaikan telah dilakukan namun timbunan tersebut tetap mengalami longsor (Gambar 13). Pada bagian kaki longsor pernah dipasang bronjong sebagai bagian dari perbaikan longsor, dan penanganan sementara yang telah dilakukan adalah menutup longsor dengan terpal untuk mencegah

terjadinya pembasahan pada lereng timbunan tersebut.

Penyelidikan geoteknik menggunakan pemboran dilakukan sebanyak 2 titik yaitu di sisi longsor bagian tengah dan di bagian atas longsor untuk mengetahui tanah asli yang tidak mengalami longsor. Gambar 14 menunjukkan perkiraan pelapisan tanah dengan potongan diperoleh dari pengukuran di lapangan.



**Gambar 13** Kondisi longsor di Utara asrama putra



**Gambar 14** Profil tanah atau batuan lokasi longsor hasil pengeboran (KSO Adhi-Wika, 2012).

Longsoran yang terjadi beberapa kali di lokasi yang sama menunjukkan bahwa perbaikan yang sebelumnya dilakukan menggunakan perkuatan geotekstil ternyata tidak menyelesaikan permasalahan yang ada. Perkiraan penyebab adalah keberadaan material *clayshale* dan adanya air tanah yang menyebabkan pelunakan tanah dasar dan tanah timbunan, sehingga beban timbunan tidak dapat dipikul oleh perkuatan yang ada. Sumber resapan air adalah dari stadion sepakbola, sehingga dibuat pipa drainase untuk mengatasi resapan tersebut.

**Lereng Selatan asrama elit putri**

Pada lokasi ini tidak terjadi longsoran, tetapi lokasi ini pernah mengalami longsor. Lokasi ini sangat terjal dengan kemiringan lereng 45° dan tinggi lereng 20 m. Di atas lereng ini adalah

badan jalan, sehingga sering dilalui kendaraan yang menambah beban lereng. Untuk menjaga stabilitas lereng perlu dilakukan pembuatan drainase horisontal.

Dari gambar topografi kondisi awal (Gambar 15) dapat dilihat bahwa di bagian ujung-ujung bangunan sisi selatan gedung asrama elit Putri merupakan area timbunan. Pengamatan di lapangan menunjukkan kondisi timbunan sebelah Barat tidak menunjukkan deformasi berlebih. Pada kaki longsoran tersebut didapati adanya material *clayshale* yang telah melapuk dan basah. Diduga bisa menjadi salah satu penyebab longsoran ini adalah keberadaan material ini dimana bila material *clayshale* yang awalnya keras akan segera mengalami degradasi kuat-geser akibat pembasahan maupun tereskspose udara.

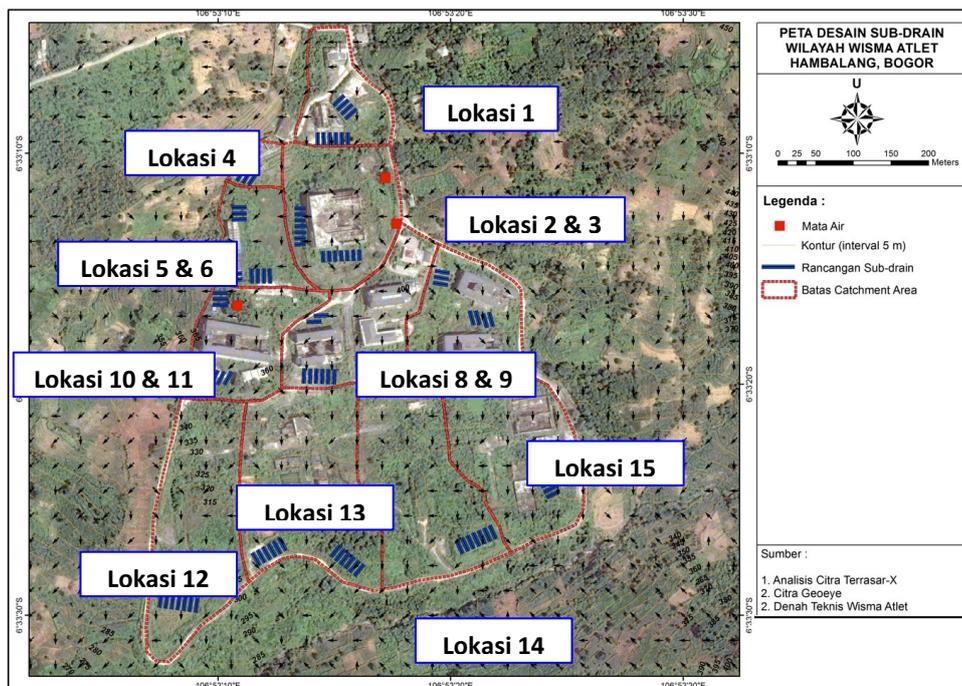
### Analisis sistem drainase horisontal

Analisis kebutuhan dan dimensi pipa horisontal dilakukan di sebelas lokasi yang rawan longsor. Selain ke sebelas lokasi tersebut, analisis juga dilakukan pada daerah di Selatan lokasi longsor. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya longsor di masa yang akan datang. Adapun lokasi-lokasi pemasangan pipa, jumlah pipa, dan area layan drainase bawah permukaan dapat dilihat pada Gambar 16. Hasil perhitungan debit di tampilkan pada Tabel 4. Lokasi pemasangan drainase horisontal meliputi arah beserta jumlah pipa yang diperlukan dapat dilihat pada Gambar 16. Jumlah pipa drainase yang dipasang dihitung berdasar jumlah air yang meresap dibagi dengan diameter pipa drainase.

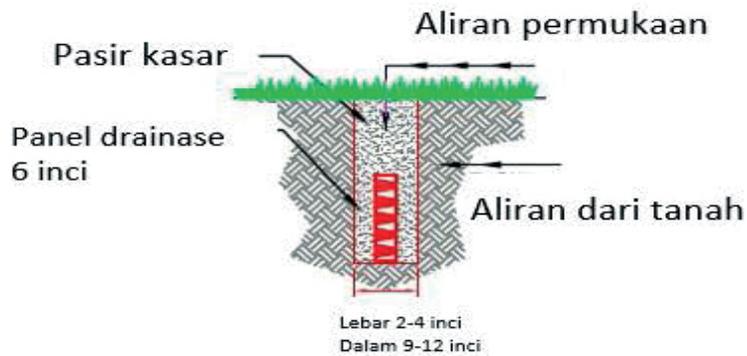
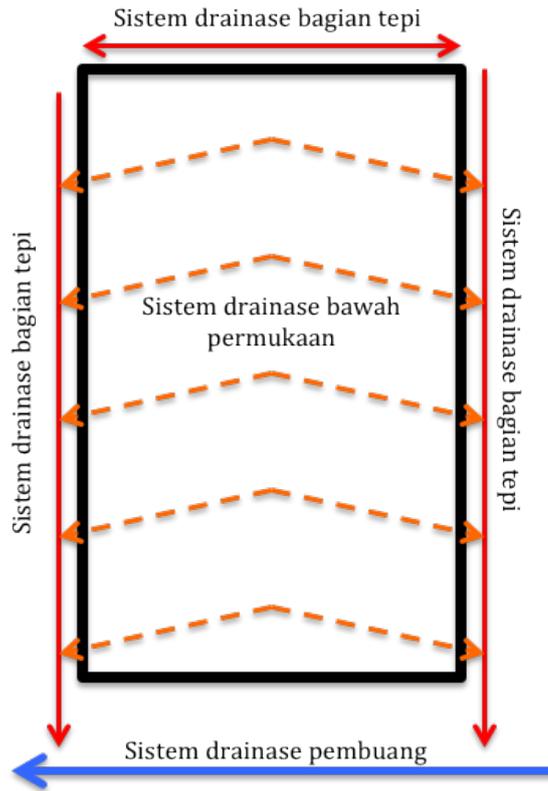
Dari hasil analisis didapat jumlah pipa yang bervariasi di setiap daerah layannya, yaitu berkisar antara 3-20 buah pipa. Beberapa daerah longsor di satukan dalam perhitungan karena mempunyai daerah layan yang sama dengan daerah lainnya. Sebagai contoh lokasi longsor di Selatan dan Barat GOR, tribun lapangan bola bagian Barat dan lereng Utara asrama elit putra, dan yang terakhir lereng Tenggara asrama elit putra dan lereng Selatan asrama elit putra. Satu hal yang harus diperhatikan adalah tersedianya drainase permukaan pada setiap keluaran (*outlet*) pipa drainase horisontal. Khusus untuk lapangan sepakbola dan lapangan atletik karena permukaannya dapat lolos air maka diperlukan penanganan khusus. Tipikal saluran drainase untuk lapangan sepakbola dan lapangan atletik seperti pada Gambar 17.



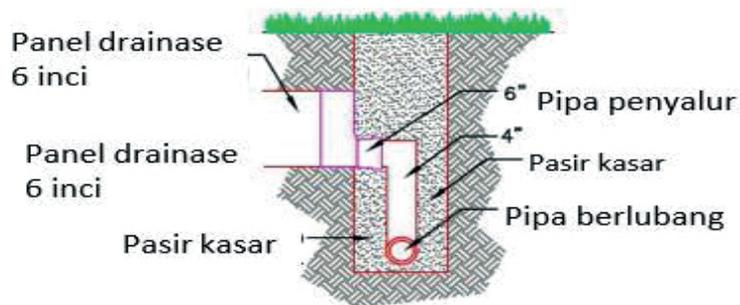
Gambar 15 Kiri kejadian longsor 2012, kanan kondisi sekarang



Gambar 16 Tampilan desain drainase horisontal beserta lokasi-lokasi pemasangan pipa dan jumlah pipa yang dibutuhkan.



Drainase bawah permukaan



Drainase bagian samping

**Gambar 17** Tipikal Saluran Drainase Untuk Lapangan Sepakbola Dan Lapangan Atletik

**Tabel 4** Hasil perhitungan jumlah pipa yang diperlukan

No	Lokasi	Luas Area (m <sup>2</sup> )	S	Diameter (m)	Jumlah Pipa	A	P	R	Q <sub>D</sub>	Q <sub>D</sub> Total	Q <sub>AT</sub>	Selisih
									(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	
1	Selatan pembangkit listrik	13994	0,123	0,10	10	0,004	0,157	0,025	0,0065	0,0645	0,0166	-0,0479
2	Lereng Barat GOR											
3	Lereng Selatan GOR	25912	0,123	0,10	14	0,004	0,157	0,025	0,0065	0,0903	0,0307	-0,0596
4	Lereng Utara stadion bola	3590	0,123	0,10	3	0,004	0,157	0,025	0,0065	0,0194	0,0043	-0,0151
5	Tribun lap bola bagian Barat											
6	Lereng Utara asrama elit putra	12246	0,123	0,10	9	0,004	0,157	0,025	0,0065	0,0581	0,0145	-0,0436
7	Lereng Tenggara Masjid	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Lereng Tenggara junior putri											
9	Lereng Selatan asrama elit putri	45308	0,123	0,10	20	0,003925	0,157	0,025	0,0065	0,1292	0,0537	-0,0755
10	Lereng Tenggara asrama elit putra											
11	Lereng Selatan asrama elit putra	19832	0,123	0,10	8	0,003925	0,157	0,025	0,0065	0,0517	0,0235	-0,0282
12	Lokasi 12	34069	0,123	0,10	7	0,004	0,157	0,025	0,0065	0,0452	0,0404	-0,0048
13	Lokasi 13	39893	0,123	0,10	12	0,004	0,157	0,025	0,0065	0,0775	0,0473	-0,0302
14	Lokasi 14	36174	0,123	0,10	7	0,004	0,157	0,025	0,0065	0,0452	0,0429	-0,0023
15	Lokasi 15	31787	0,123	0,10	6	0,004	0,157	0,025	0,0065	0,0388	0,0377	-0,0011

## KESIMPULAN

Hasil kajian pada lokasi P3SON Hambalang mengindikasikan bahwa daerah Hambalang merupakan daerah yang terletak pada formasi Jatiluhur (*Tmj*) dan terletak pada zona dengan kerentanan tanah menengah. Dari hasil pengamatan lapangan dan data sekunder dapat disimpulkan bahwa longsor yang terjadi di Hambalang dapat disebabkan oleh: adanya batuan lempung yang mudah mengembang dan membubur jika terkena air, adanya tanah timbunan yang kurang padat, adanya air permukaan yang mengalir bebas dan meresap ke dalam tanah, dan adanya penggalian pada lereng bagian bawah yang terjal ( $>60^\circ$ ) yang memotong lapisan lempung mengembang.

Untuk meminimalkan kejadian longsor yang mungkin terjadi, desain drainase bawah permukaan dapat menjadi salah satu solusi yang dapat diterapkan pada kawasan tersebut. Tidak adanya air bawah permukaan yang mengendap adalah kondisi ideal untuk mencegah bahaya longsor pada setiap kejadian hujan. Hal ini terbukti dengan adanya fakta bahwa dari sekitar 138,5 mm hujan harian maksimum tahunan rata-rata yang jatuh di daerah Hambalang, 21,3 mm meresap ke dalam tanah yang berpotensi menimbulkan bidang gelincir.

Untuk mengamankan daerah P3SON dari bahaya longsor yang disebabkan oleh resapan air, perlu di buat sistem drainase bawah permukaan pada sisi luar kawasan (Timur) dan di dalam kawasan P3SON itu sendiri. Drainase bawah permukaan pada area sebelah Timur lokasi Hambalang perlu dilakukan untuk mencegah air tanah dangkal yang masuk ke dalam area studi. Diameter pipa yang diperlukan bervariasi antara 20-35 cm yang dibangun sekitar 5 m di bawah permukaan tanah dengan jumlah pipa dua buah.

Secara teknis terdapat sebelas lokasi yang perlu dilakukan pembuatan drainase horisontal di

dalam kawasan Hambalang dikarenakan pada lokasi tersebut teridentifikasi adanya longsor, dan ada empat lokasi di Selatannya yang perlu di buat drainase horisontal untuk mencegah terjadinya longsor pada kemudian harinya. Desain drainase horisontal adalah diameter pipa 10 cm, spasi antar pipa drainase adalah 8 m, panjang pipa drainase 15-20 m, kemiringan pipa drainase  $10^\circ$ , dan arena kedalaman lapisan lanau adalah 0-6 m, maka posisi pipa drainase berkisar 3-5 m dari permukaan tanah. Jumlah pipa yang diperlukan bervariasi antar daerahnya. Konfigurasi sistem drainase ini dapat menurunkan elevasi muka air tanah hingga elevasi muka air dibawah bidang gelincir.

Kegiatan kajian desain dan studi awal drainase bawah permukaan di kompleks Hambalang ini dilakukan dalam rangka *task force* dari kementerian PUPR. Kajian ini dilakukan dalam waktu yang sesingkat-singkatnya untuk dapat menghasilkan rekomendasi yang bisa memberikan gambaran penanganan secara menyeluruh. Oleh karena ini perlu dilakukan studi lebih detail jika konsep yang diusulkan dalam kajian ini akan diterapkan. Studi lebih lanjut juga di harapkan dapat mempertimbangkan elevasi muka air tanah di kawasan permukiman di hulu kompleks Hambalang agar tetap dapat diakses masyarakat untuk kebutuhan domestik.

## DAFTAR PUSTAKA

- BAKN DPR RI. 2012. Laporan Hasil Penelaahan Badan Akuntabilitas Keuangan Negara DPR RI Terhadap Laporan Hasil Pemeriksaan Investigatif (Tahap I) BPK-RI atas Pembangunan Pusat Pendidikan Dan Sekolah Olahraga Nasional pada Kementerian Pemuda dan Olahraga di Jakarta dan Bogor. Jakarta, November 2012.

- Broto, G. S. D. 2016. Siaran Pers No. 15/Kom-Publik/Kemenpora/3/2016: Pertemuan Tim Pemerintah Dengan KPK Soal Hambalang, Senin, 28 Maret 2016, <http://www.kemenpora.go.id/index/preview/konferensi/208>, diakses pada: 11 Mei 2016.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. 1988. *Applied Hydrology*, New York: Mc Graw-Hill. ISBN 0-07-0108102
- Cook D. I., Santi P.M., Higgins J.D. 2001. *Horizontal Landslide Drain Design: State of the Art and Suggested Improvements*, Department of Geology and Geological Engineering, Colorado School of Mines.
- Darcy, H. 1856. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont, Paris.
- Forrester K. 2001. *Subsurface drainage for slope stabilization*. ASCE Press, 222pp. ISBN: 9780784473801.
- Greg M., Pohll G. M., Carroll R. W. H., dan Reeves D. M. 2013. *Design Guidelines for Horizontal Drains used for Slope Stabilization*. Washington: Washington State Department of Transportation.
- Hardiyatmo C. H. 2012. *Tanah Longsor dan erosi: Kejadian dan Penanganan*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Kalsim D. K. 2012. *Teknik Drainase Bawah Permukaan untuk Pengembangan Lahan Pertanian*. IPB, Bogor.
- Kopecky M., Ondrasik M., dan Antolova D. 2013. *Horizontal Drains as Effective Measure for Landslide Remediation*, *Studio Geotechnica et Mechanica*. Vol. XXXV, No.1.
- KSO Adhi-Wika. 2012. *Konsep Penanggulangan Longsoran dan Perbaikan Lereng* Pusat Pendidikan dan Pelatihan Atlet Bogor. Jakarta: Laporan Kegiatan KSO Adhi Karya-Wijaya Karya.
- Lin D. G., Hung S. H., Ku C. Y., dan Chan H. C. 2016. *Evaluating the Efficiency of Subsurface Drainages for Li-Shan Landslide in Taiwan*. *Natural Hazards Earth System Science*.
- Locat J., Perret D., dan Turmel D. 2008. *Embankment Slope Stabilisation Using Subhorizontal Drains at Highway 39 Near Drayton Valley Alberta*. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Canadian Conference on Geohazards*.
- Luthfi, A., Tobing, dan Tigor. 1995. *Peta Geologi Lembar Bogor - Jawa*, skala 1 : 100.000. Bandung: P3G.
- Pathmanathan. 2013. *Numerical Simulation of the Performance of Horizontal Drainage*, A thesis Master of Science in Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University
- Pohll G. M., Carroll R. W. H., Reeves D. M., Parashar R., Muhunthan B., Thiyagarajah S., Badger T., Lowell S., dan Willoughby K. A. 2013. *Design guidelines for horizontal drains used for slope stabilization*, WSDOT research report. Washington State Department of Transportation.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. 1991. *Peta Zona Kerentanan Gerakan Tanah Lembar Bogor*. Bandung: P3G.
- Puslitbang SDA. 2008. *Penelitian pengendali daya rusak air*. No. IP 0101/05/La-HITA/2008.
- Rahardjo H., Hritzuk K. J., Leong E. C., dan Rezaur R. B. 2003. *Effectiveness of Horizontal Drains for Slope Stability*. *Science Direct: Engineering Geology* 69 (295-308).
- Santi P.M., Elifrits C.D. 2001. *Landslide Stabilization Using Wick Drains*, University of Missouri-Rolla SNI 03-1962-1990. 1990. *Tata Cara Perencanaan Penanggulangan Gerakan Tanah*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional (BSN).
- Soewarno. 2015. *Klimatologi: Pengukuran dan Pengolahan Data Curah Hujan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (USDA-SCS). 1972. *National Engineering Handbook*. Section 4, Hydrology.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini kami ucapkan terimakasih pihak Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kepala Balitbang PU, Kepala Pusair, dan Kepala Balai Sabo atas kesempatan yang diberikan melakukan kajian ini. Tidak pula penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan di Balai Sabo atas bantuan dan dukungannya dalam melakukan kajian ini. Ucapan Terima kasih juga disampaikan kepada segenap anggota tim gabungan audit teknis Kompleks P3SON Hambalang yang tergabung dari Pusat Litbang Permukiman, Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, dan Pusat Litbang PKPT. Tidak lupa disampaikan apresiasi kepada warga Hambalang yang sangat kooperatif dan mendukung terlaksananya penelitian ini.